

На правах рукописи



Шамаль Михаил Александрович

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ГЛАВНЫХ
ПРИВОДОВ МОЩНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Екатеринбург – 2013

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург.

Научный руководитель: **Карякин Александр Ливиевич**
доктор технических наук, старший научный сотрудник.

Официальные оппоненты: **Карандаев Александр Сергеевич**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова», главный научный сотрудник кафедры электротехники и электротехнических систем;

Костыгов Александр Михайлович
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический институт», декан электротехнического факультета.

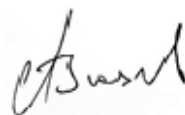
Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», г. Санкт-Петербург.

Защита состоится 18 декабря 2013 года в 14 часов 15 минут на заседании диссертационного совета Д212.285.03 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. Э-217.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Автореферат разослан «15» ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, д.т. н.



Зюзов А.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одной из основных задач в электротехнической отрасли является задача оценки ресурса на этапе проектирования электротехнических комплексов, а также оценка выработанного и прогнозирование остаточного ресурса комплексов в период эксплуатации. Для объектов и систем, которые находятся в длительной эксплуатации, на первый план выходят вопросы, связанные с непрерывной диагностикой их технического состояния и определения остаточного ресурса. Последняя проблема - продление срока службы эксплуатируемого электрооборудования, характерна для горнодобывающей промышленности. В частности, это относится к парку шагающих экскаваторов, основное количество которых работает на российских горных предприятиях с 70-80-х годов прошлого столетия.

Работоспособность экскаватора зависит от исправного функционирования всех его систем, включая механическое, электрическое и рабочее оборудование. Одним из наиболее ответственных узлов экскаватора является электротехнический комплекс (ЭТК) главных приводов. Отказ электропривода одного из трех главных механизмов экскаватора - подъема, тяги или поворота - приводит к остановке всего экскаватора. При этом, одной из основных проблем являются отказы электрооборудования ЭТК экскаватора, обусловленные режимами работы и влиянием горнотехнических условий эксплуатации. Прогнозирование таких параметров, как сопротивление изоляции, параметров вибрации, показателей теплового режима работы электрооборудования может быть использовано для раннего выявления дефектов, вызывающих отказы электрооборудования ЭТК главных приводов экскаватора.

Современный уровень развития микропроцессорной техники позволяет использовать специализированные технические средства, методы и алгоритмы для автоматического контроля диагностических параметров, диагностики и прогнозирования технического состояния ЭТК главных приводов экскаваторов.

Целью диссертационной работы является разработка методики прогнозирования диагностических параметров технического состояния электрооборудования электротехнических комплексов главных приводов мощных экскаваторов.

Идея работы: разработка методов эффективной эксплуатации электрооборудования главных приводов экскаваторов и раннее предупреждение отказов путем прогнозирования диагностических параметров электротехнического комплекса электропривода.

Для достижения поставленной цели в работе рассматриваются следующие **задачи:**

- 1) разработка диагностической модели электротехнического комплекса главных приводов экскаваторов;
- 2) определение состава диагностических параметров, характеризующих техническое состояние электротехнического комплекса главных приводов одноковшовых экскаваторов;
- 3) разработка методики и алгоритмов предобработки входной последовательности диагностических сигналов электротехнических комплексов с целью ее представления в виде суперпозиции компонентов с заданными свойствами;
- 4) разработка адаптивной системы прогнозирования компонентов разложения входных последовательностей диагностических сигналов электротехнических комплексов с помощью линейных предикторов;
- 5) определение параметров настройки линейных предикторов, влияющих на точность прогнозирования компонентов разложения входных диагностических сигналов электротехнических комплексов главных приводов одноковшовых экскаваторов;
- 6) постановка и решение задачи поиска оптимальной структуры разложения входных последовательностей диагностических сигналов электротехнического комплекса с использованием результатов прогнозирования компонентов разложения;
- 7) оценка погрешности предлагаемой методики прогнозирования параметров технического состояния электротехнического комплекса электропривода.

Автор защищает:

- 1) методику разложения входной дискретной последовательности диагностических сигналов электротехнического комплекса главных электроприводов одноковшовых экскаваторов на компоненты с заданными свойствами;

2) методику построения адаптивного алгоритма прогнозирования на основе предложенного алгоритма декомпозиции дискретной последовательности диагностических сигналов электротехнического комплекса;

3) методику поиска оптимальной структуры декомпозиции входной последовательности диагностических сигналов электротехнического комплекса главных электроприводов одноковшовых экскаваторов;

4) модель адаптивной системы прогнозирования дискретных диагностических сигналов электротехнического комплекса, отличающуюся структурой разложения и используемой весовой функцией фильтра.

Методы исследований. При проведении теоретических и практических исследований были использованы методы математической статистики, градиентные методы многомерной оптимизации, методы теории автоматического управления, положения теории информации и надежности технических систем, а также методы математического моделирования с использованием пакета программ Matlab.

Научная новизна полученных автором результатов заключается в следующем:

1) предложена и обоснована новая методика прогнозирования диагностических параметров технического состояния электрооборудования и электрических машин главных приводов одноковшовых экскаваторов, отличающаяся структурой адаптивной системы прогнозирования и весовой функцией фильтра, позволяющей выделять из входных последовательностей компоненты со свойствами детерминированных синусоидальных функций;

2) разработана новая адаптивная система прогнозирования диагностических параметров технического состояния электротехнических комплексов одноковшовых экскаваторов, отличающаяся тем, что структура модели, ее параметры и интервал упреждения являются объектами структурной и параметрической оптимизации.

Практическая ценность полученных результатов заключается в следующем:

1) линейный характер вычислений предложенного метода прогнозирования позволяет использовать его во встроенных информационных системах

экскаваторов для прогнозирования диагностических параметров в режиме реального времени;

2) результаты прогнозирования могут быть использованы для организации работ по техническому обслуживанию оборудования электротехнических комплексов главных приводов экскаваторов;

3) предложенный метод может быть использован как базовый при построении более сложных систем диагностирования электротехнических комплексов главных приводов экскаваторов, учитывающих взаимное влияние диагностических параметров;

4) методика разложения дискретных последовательностей диагностических параметров электротехнических комплексов может быть использована для анализа свойств регистрируемых сигналов.

Обоснованность и достоверность научных положений подтверждена сравнением результатов прогнозирования сопротивления изоляции электрических машин трех главных электроприводов экскаватора ЭШ 40.100 на интервале 25 дней с реальными данными. Относительная погрешность прогноза тренда на данном интервале не превышает 5% для всех последовательностей.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на Уральской горнопромышленной декаде (Екатеринбург, 2004, 2006, 2010 и 2013г.), а также на VII Международной конференции по автоматизированному электроприводу (Иваново, 2012г.). Получено авторское свидетельство о регистрации программного комплекса «Декомпозиция диагностических параметров электротехнических комплексов экскаваторов».

Теоретические результаты работы используются в курсе «Анализ и синтез систем управления электроприводом» при подготовке магистров по направлению 10400.65 «Электроэнергетика и электротехника». Кроме того результаты работы были использованы при разработке математического, алгоритмического и программного обеспечения для информационных систем одноковшовых экскаваторов, производства ОАО «Уралмашзавод».

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех основных глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 58 рисунков и 20 таблиц. Список литературы состоит из 117 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрены задачи и методы теории технической диагностики, рассмотрены особенности диагностирования технического состояния электротехнических комплексов главных приводов мощных экскаваторов. Предложено в качестве основы для построения диагностической модели ЭТК экскаватора использовать функциональный подход, согласно которому ЭТК экскаватора может быть представлен в виде динамической системы, функционирующей в пространстве своих диагностических параметров. Показаны основные особенности эксплуатации ЭТК одноковшовых экскаваторов, выполнена декомпозиция ЭТК экскаватора по функциональному назначению, а также приведен перечень диагностических параметров для каждой из подсистем. Рассмотрены современные средства технического диагностирования, применяемые для контроля параметров работы ЭТК экскаваторов и диагностики его технического состояния. Обзор существующих технических средств диагностики электрооборудования ЭТК экскаваторов показал, что, в основном, системы используются для контроля и архивации диагностических параметров. Предложено на базе существующих автоматических встроенных технических средств диагностики электрооборудования ЭТК экскаваторов реализовать алгоритмы автоматической предварительной обработки и прогнозирования диагностических параметров. Реализация алгоритмов прогнозирования диагностических параметров в виде прикладного программного обеспечения информационных систем экскаватора позволит реализовать индивидуальный подход к оценке технического состояния ЭТК конкретного экскаватора для конкретных условий эксплуатации, что может быть использовано для принятия своевременных решений по проведению ремонтов и технического обслуживания (ТО) электрооборудования ЭТК экскаваторов. На рис. 1 представлена структурная схема процесса эффективной эксплуатации ЭТК экскаватора с использованием результатов прогнозирования диагностических параметров.

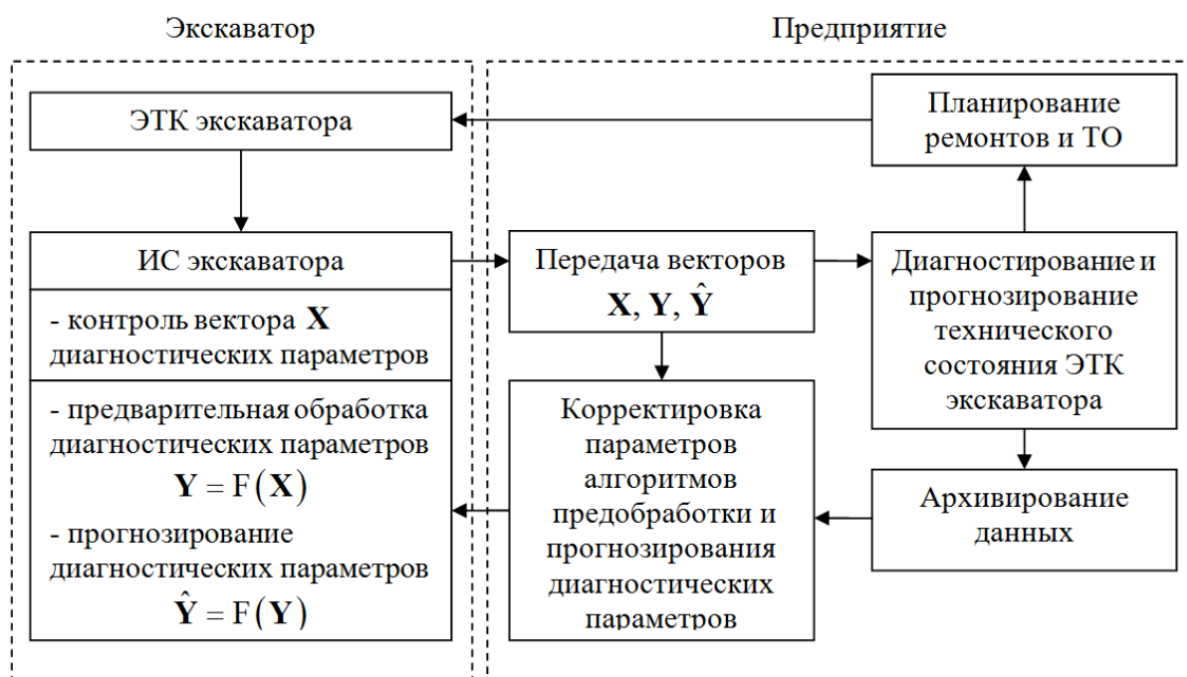
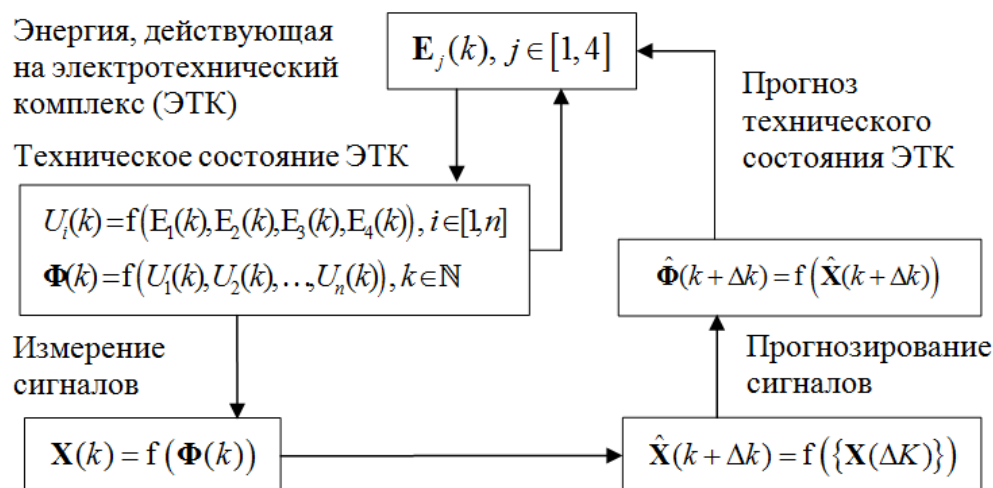


Рис. 1. Структурная схема процесса эффективной эксплуатации ЭТК экскаватора с использованием результатов прогнозирования

Выполнен обзор методов и моделей прогнозирования дискретных временных последовательностей, определены их достоинства и недостатки. В результате в качестве основного метода прогнозирования диагностических параметров был выбран метод, основанный на использовании авторегрессионных свойств диагностических параметров. Недостатками авторегрессионных методов прогнозирования являются возможность моделирования только линейных процессов, а также трудоемкость при идентификации сложных зависимостей. Преодолеть эти недостатки возможно с помощью введения алгоритмов предобработки входной последовательности – фильтрации, с помощью которой входная последовательность может быть приведена к некоторому заданному виду.

Во второй главе решена задача разложения входных последовательностей на компоненты с требуемыми свойствами. Диагностическая модель ЭТК экскаватора рассматривается как функциональная модель типа «черный ящик», для которой законы функционирования заранее неизвестны (рис. 2). Использование дискретной модели ЭТК необходимо, так как прогнозирование диагностических параметров предполагает использование дискретных временных интервалов упреждения, что определяется дискретным характером обработки данных в ЭВМ.



$E_1(k)$ - энергия окружающей среды, $E_2(k)$ - рабочие процессы, $E_3(k)$ - потенциальная энергия ЭТК, $E_4(k)$ - ремонт и ТО, $U_i(k)$ - износ i -го элемента ЭТК, $\Phi(k)$ - техническое состояние ЭТК для отсчета k , $X(k)$ - вектор значений диагностических сигналов, $\hat{X}(k + \Delta k)$ и $\hat{\Phi}(k + \Delta k)$ - прогнозируемые значения вектора сигналов и технического состояния ЭТК, Δk - период наблюдений.

Рис. 2. Дискретная диагностическая модель ЭТК экскаватора

Для решения задачи декомпозиции диагностических параметров был рассмотрен процесс адаптивной фильтрации, в основе которого лежит использование некоторой весовой функции $W_i(k)$. На рис. 3 представлена структурная схема процесса адаптивной фильтрации, где $u_i(k)$ - параметр, характеризующий износ элемента ЭТК, где $i \in [1, n]$, $n \in \mathbf{N}$ и $k \in \mathbf{N}$, $x_i(k)$ - диагностический параметр, $\varepsilon_i(k)$ - шум в канале передачи, $y_i(k)$ - аппроксимация диагностического параметра, $e_i(k)$ - ошибка аппроксимации.

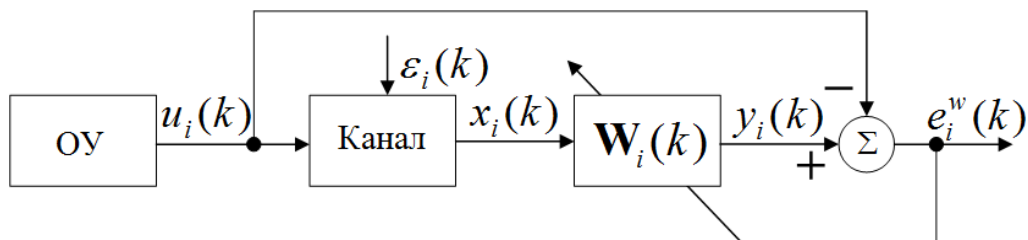


Рис. 3. Структурная схема процесса адаптивной фильтрации

Для простоты изложения на рис. 3 представлено функционирование алгоритма только для текущего момента времени и для одного диагностического параметра, поэтому индекс i и метка времени k далее были опущены. Резуль-

тат фильтрации в векторной форме можно записать как

$$y = \mathbf{W}^T \mathbf{x} = \mathbf{x}^T \mathbf{W}, \quad (1)$$

тогда сигнал ошибки равен

$$e = u - y = u - \mathbf{x}^T \mathbf{W}, \quad (2)$$

где $\mathbf{x}(k) = [x(k) \ x(k-1) \dots x(k-n)]^T$ - вектор входной последовательности в момент времени $k \in \mathbb{N}$ размерностью $n \in \mathbb{N}$, $k > n$, \mathbf{W} - вектор весовых коэффициентов w_j , где $j \in [-m, m]$, $m \in \mathbb{M}$, $m < n$, $M = (2m + 1)$ - число элементов весовой функции, T - символ операции транспонирования.

Предложено использовать для определения значений весовых коэффициентов следующую нормированную, симметричную относительно нулевого отсчета, функцию:

$$w_j = \left(1 - (j \cdot b_1)^2\right) e^{-(j \cdot b_2)^2}, \quad (3)$$

где $j = -m, -m+1, \dots, 0, \dots, m-1, m$, $b_1, b_2 \in \mathbb{R}$ - параметры весовой функции.

Объединив (2) и (3), получим окончательный вид целевой функции в виде системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} e^w(k) &= u(k) - y(k) = u(k) - \mathbf{x}^T \mathbf{W} \\ \mathbf{W} &= F(b_1, b_2) \end{aligned} \right\} \Rightarrow CKQ(e^w) = \xi^w = \sigma(e^w) \rightarrow \min \quad (4)$$

Решение задачи (4) непосредственно зависит от свойств рассматриваемой последовательности. Поэтому поиск решения может быть осуществлен только численными методами на основе реальных или тестовых последовательностей. Поскольку решение задачи оптимизации требует наличия не только отсчетов выходного сигнала системы $\{x(n)\}$, но и последовательности отсчетов исходного сигнала $\{u(n)\}$, то удобней воспользоваться тестовыми последовательностями с известными параметрами. При этом необходимо понимать, что выбор тестовой последовательности определяет не только свойства базисных функций, но и в дальнейшем будет определять свойства отфильтрованной последовательности.

Поиск параметров весовой функции выполнили с помощью синусоидальной функции и шумовой компоненты

$$\begin{cases} x(k) = u(k) + \varepsilon(k) \\ u(k) = \sin(\omega'_q k) \end{cases}, \quad (5)$$

где $\omega'_q = \omega'_s / 2^q$ - нормированная частота колебания последовательности, кратная нормированной частоте Котельникова-Шеннона ω'_s , q - показатель степени, $\varepsilon(k)$ - «белый шум» с параметрами нормального распределения $\mu(\varepsilon) = 0$ - математическое ожидание, $\sigma(\varepsilon) = \text{var}$ - СКО, $k \in [1, n]$, $n = 10240$. Нормированная частота Котельникова-Шеннона

$$\left. \begin{aligned} T' &= 1 \\ \omega' &= 2\pi/T' = 2\pi \end{aligned} \right\} \Rightarrow \omega'_s = \frac{\omega'}{2} = \pi, \quad (6)$$

где T' - нормированный период колебания последовательности.

Были рассмотрены тестовые последовательности с частотами ω'_q :

$$\left. \begin{aligned} q &\in 1, 2, 3, 4, 5 \\ \omega'_q &= \omega'_s / 2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \omega_q \in \frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{8}, \frac{\pi}{16}, \frac{\pi}{32}, \quad (7)$$

и значениями параметров шумовых компонент:

$$\begin{cases} \sigma(\varepsilon) \in 0, 2; 0, 4; 0, 6; \\ \mu(\varepsilon) = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Поиск параметров фильтров был выполнен с использованием тестовых последовательностей с помощью метода покоординатного градиентного спуска с фиксированным шагом. В результате численного эксперимента было определено среднее значение оптимального, по критерию (4), соотношения параметров весовой функции:

$$E(b_1/b_2) = 0,881. \quad (9)$$

Анализ функции показал, что в полосе пропускания АЧХ фильтра имеет коэффициент усиления 0,47 Дб, что приводит к частичному прохождению полезного сигнала в сигнал ошибки. Для устранения этого эффекта были введены дополнительно два цикла обработки остатков аппроксимации. В результате повторного эксперимента было найдено оптимальное, в смысле (4), соотношение

параметров фильтра:

$$E(b_1/b_2) = 1,004 \Rightarrow b = b_1 = b_2, \quad (10)$$

а также определено окончательное выражение для расчета весовой функции:

$$\begin{cases} w_j(b) = (1 - (j \cdot b)^2) e^{-(j \cdot b)^2}, \\ \mathbf{W}'' = 3\mathbf{W} - 3\mathbf{W}^2 + \mathbf{W}^3. \end{cases} \quad (11)$$

Функция \mathbf{W}' , эквивалентная тройной обработке входной последовательности, далее была использована для построения алгоритма декомпозиции входной последовательности. Для удобства использования обозначим ее \mathbf{W} .

Сравнительный анализ СКО ошибок аппроксимации тестовых последовательностей с помощью треугольной и гауссовой функций показал, что, в среднем, общая точность аппроксимации тестовых последовательностей с помощью предложенной весовой функции увеличилась на 25%:

$$\begin{aligned} E(\min(\sigma(e^\Delta)) / \sigma(e^w)) &= 1,250; \\ E(\min(\sigma(e^g)) / \sigma(e^w)) &= 1,262. \end{aligned} \quad (12)$$

Разложение дискретных по времени последовательностей диагностических параметров возможно на основании известной зависимости относительного значения частоты среза фильтра от параметра b (рис. 4).

На рис. 5 представлены структурная схема алгоритма декомпозиции диагностических параметров (рис. 5(а)) и структурная схема процесса адаптивной фильтрации с учетом алгоритма декомпозиции (рис. 5(б)).

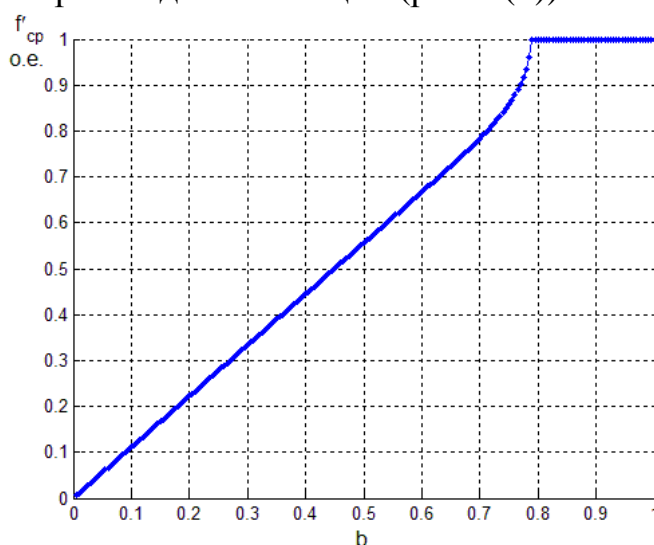


Рис. 4. Зависимость относительного значения частоты среза $f'_{cp} = f(b)$

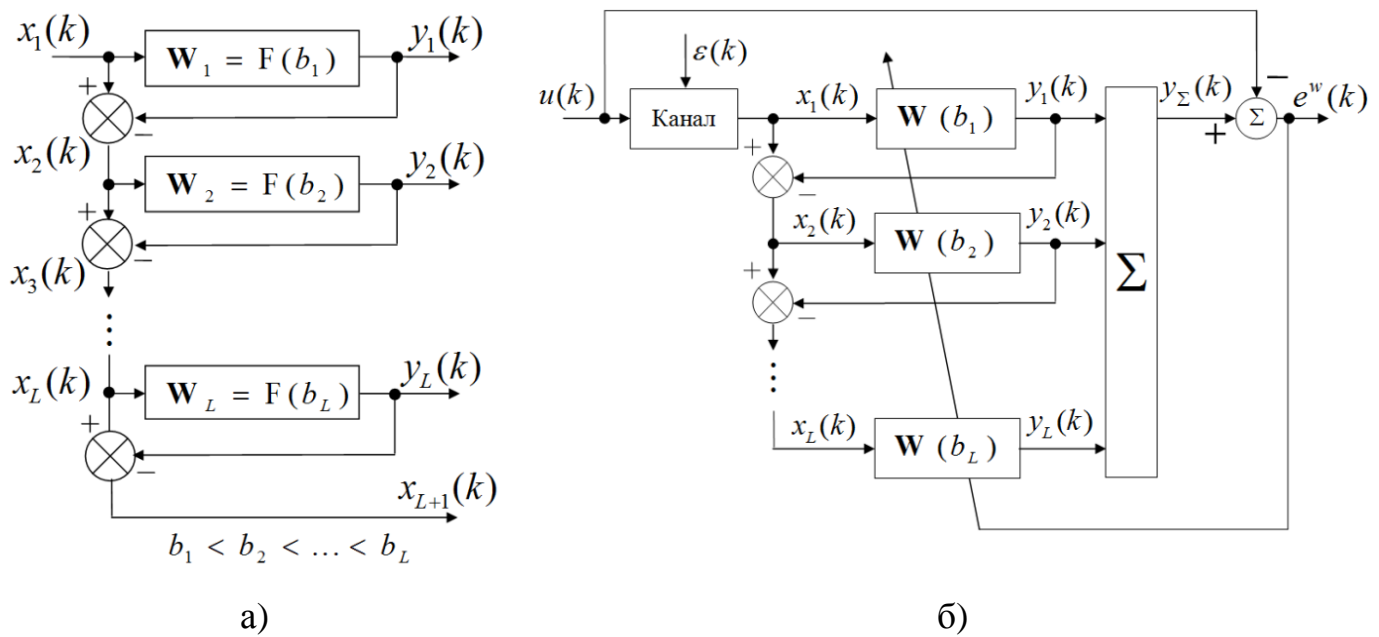


Рис. 5. Структурные схемы: а) алгоритма декомпозиции входной последовательности, б) процесса адаптивной фильтрации

Если рассмотреть вопрос прогнозирования входной последовательности в целом, то можно предположить, что для конкретной последовательности может быть найдено оптимальное соотношение пары параметров

$$\langle L^*, l^* \rangle, \quad (13)$$

где L^*, l^* – оптимальные значения глубины разложения и числа используемых для прогнозирования параметров, соответственно.

В третьей главе рассмотрен алгоритм прогнозирования диагностических параметров. На рис. 6 представлена структурная схема адаптивной системы прогнозирования временной последовательности на Δk значений вперед. В данной структуре присутствуют два адаптивных элемента: весовая функция фильтра W и весовая функция предиктора H .

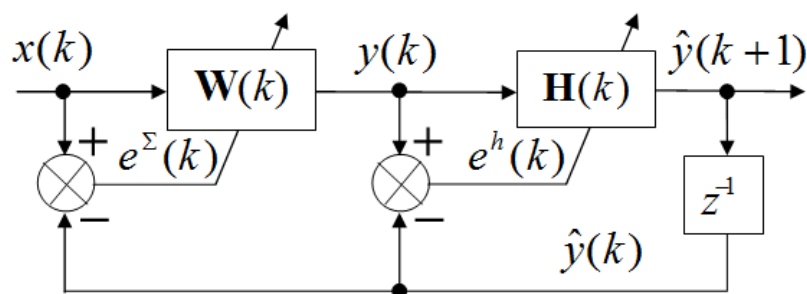


Рис. 6. Структурная схема адаптивной системы прогнозирования временной последовательности

Отличие вектора \mathbf{W} от \mathbf{H} заключается в том, что значения элементов весовой функции фильтра определены выражением (11), а весовая функция предиктора заранее не определена. Целевая функция минимума СКО ошибки системы прогнозирования может быть записана как

$$\left. \begin{aligned} e^\Sigma &= e^w + e^h \\ e^w &= F(\mathbf{W}(b)) \\ e^h &= F(\mathbf{H}(p)) \end{aligned} \right\} \Rightarrow CKO(e^\Sigma) = \xi^\Sigma = \sigma(e^\Sigma) \rightarrow \min, \quad (14)$$

где $\mathbf{W}(b)$ - вектор фильтра, как функция от параметра $b \in \mathbb{R}$, $\mathbf{H}(p)$ - вектор предиктора, как функция от числа его элементов $p \in \mathbf{P}$, $e^h(k)$ - ошибка прогнозирования

$$e^h(k) = y(k) - \hat{y}(k), \quad (15)$$

$e^w(k)$ - ошибка аппроксимации

$$e^w(k) = x(k) - y(k) \quad (16)$$

$e^\Sigma(k)$ - общая ошибка системы

$$e^\Sigma(k) = x(k) - \hat{y}(k) = e^w(k) + e^h(k). \quad (17)$$

Согласно выражению (17), чем более сложную зависимость может реализовать предиктор, тем выше точность прогнозирования всей системы. Численный эксперимент оценки точности прогнозирования тестовых последовательностей для системы (рис. 6) с $\mathbf{W} = (1)$ показал, что ошибки прогнозирования зависят, в основном, от стохастических свойств тестовых последовательностей. Следовательно, все тестовые последовательности, а значит, и компоненты декомпозиции последовательностей диагностических параметров, могут быть приведены без потери точности, но с увеличением интервала упреждения, к некоторому нормированному виду:

$$\omega_q^d = d \omega_q, \quad (18)$$

где $d \in \mathbf{D}$ - нормирующий коэффициент или, иначе, период упреждения.

С учетом нормировки алгоритм формирования обучающих множеств входных \mathbf{I}^d и выходных \mathbf{O}^d векторов можно записать следующим образом:

$$\mathbf{I}^d = \begin{bmatrix} y(k_0) & y(k_1) & \dots & y(k_{\frac{n}{2}-1}) \\ y(k_0-d) & y(k_1-d) & \dots & y(k_{\frac{n}{2}-1}-d) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y(k_0-dp) & y(k_1-dp) & \dots & y(k_{\frac{n}{2}-1}-dp) \end{bmatrix}, \quad (19)$$

$$\mathbf{O}^d = \begin{bmatrix} y(k_1) & y(k_2) & \dots & y(k_{\frac{n}{2}}) \end{bmatrix},$$

где отсчеты на нормированной временной оси рассчитываются как

$$\begin{cases} k_{i+1} = k_i + d, k_0 = d \cdot p, \\ i \in 0, 1, \dots, \frac{n}{2} - 1, n \in \mathbf{N}. \end{cases} \quad (20)$$

Из (19) следует, что для каждой последовательности может быть найдены оптимальные значения пары параметров для настройки предиктора

$$\langle d^*, p^* \rangle, \quad (21)$$

где d^* - оптимальное значение периода упреждения, p^* - оптимальное значение размерности предиктора.

По сути, в случае стационарности свойств периодических компонентов разложения, задача их прогнозирования сводится к восстановлению отсчетов последовательности в пределах одного периода их колебаний. Следовательно, наличие выборки, соответствующей одному периоду колебания последовательности является необходимым минимальным условием для настройки предиктора. Это условие не может быть выполнено в отношении тренда. Кроме того, введение нормировки отсчетов входных последовательностей может привести к тому, что в обучающем множестве может оказаться меньше векторов, чем элементов вектора предиктора. В обоих этих случаях предиктор не сможет обобщить информацию о функционировании процесса, следовательно, будет настроен неверно.

На рис. 7 приведена блок-схема алгоритма увеличения размерности обучающих множеств на основе их собственных векторов с добавлением шумовой составляющей типа «белый шум» с известными параметрами нормального распределения. При этом СКО искусственной помехи становится дополнительным параметром настройки предиктора. Этот алгоритм может быть использован как альтернативный для настройки предикторов для компонентов с недостаточным объемом выборки. На рис. 8 представлена окончательная структурная схема адаптивной системы прогнозирования дискретных по времени последовательностей диагностических параметров.

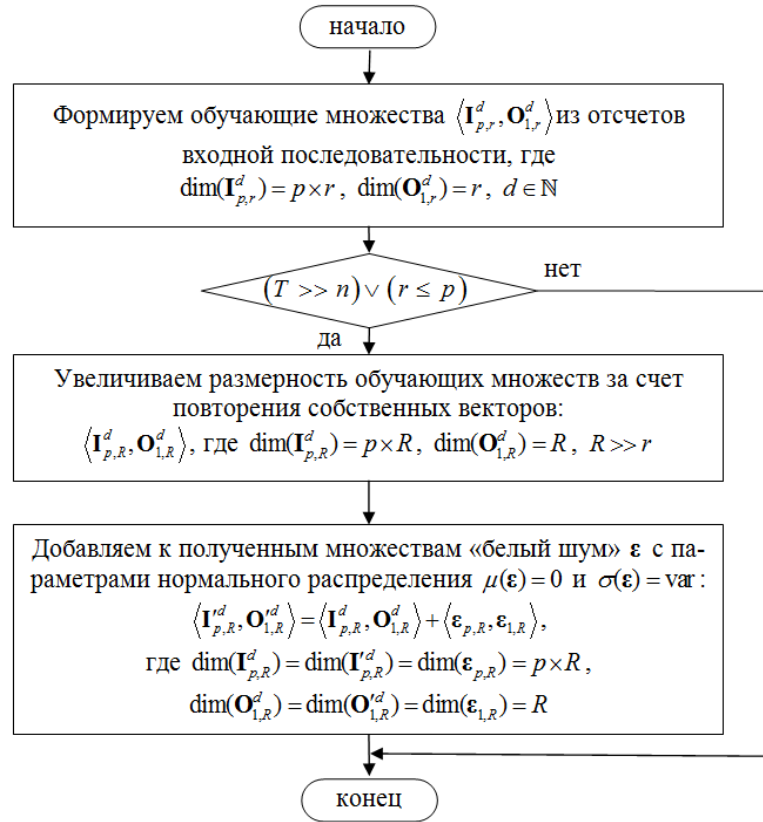


Рис. 7. Блок-схема алгоритма формирования обучающих множеств

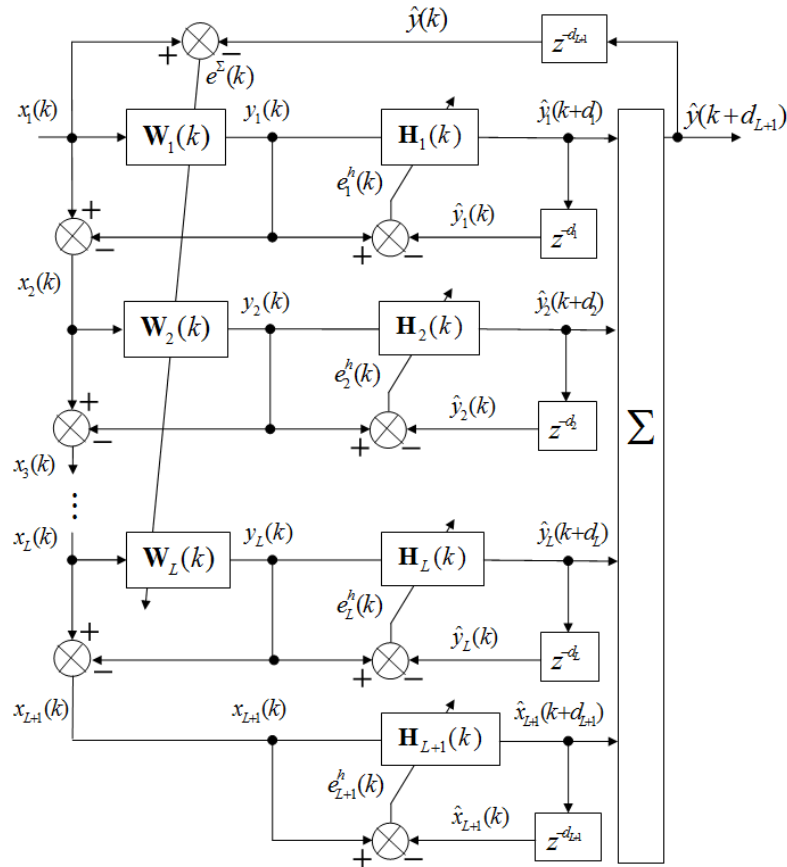


Рис. 8. Структурная схема адаптивной системы прогнозирования с использованием компонентов разложения

В четвертой главе рассмотрен пример прогнозирования последовательностей реальных дискретных по времени диагностических параметров.

Соппротивление изоляции якорных цепей главных электроприводов экскаватора ЭШ 40.100 были зарегистрированы в период эксплуатации с 15 марта 2004 г. по 22 июля 2004 г. Объем каждой выборки составляет $n = 190$ отсчетов. Наблюдения производились каждые 12 часов, в соответствии с графиком работы. Соппротивление изоляции измерялось мегаомметром ЭСО210/2 (измерительное напряжение 1000В) с пределом шкалы измерения 50 МОм. Для каждой из последовательностей с использованием $n_1 = 140$ первых отсчетов были найдены оптимальные, с точки зрения минимума ошибки прогнозирования, параметры структуры адаптивной системы (рис. 8). Для оценки точности прогнозирования были использованы отсчеты $k \in [141, 190]$. В таблице 1 представлены параметры декомпозиции и статистики абсолютных значений ошибок прогнозирования последних $n_2 = 50$ отсчетов. На рис. 9 представлен результат прогнозирования сопротивления изоляции электропривода поворота.

Таблица 1

Привод	L^*	l^*	Статистики абсолютных ошибок прогнозирования			
			$x(k), d=1$		тренд $y_1(k), d=50$	
			$\sigma(e^z)$	$\mu(e^z)$	$\sigma(e_1)$	$\mu(e_1)$
Подъем	46	38	12,375	3,305	1,150	3,106
Тяга	50	14	12,106	-2,930	1,180	1,489
Поворот	16	15	9,524	-2,877	0,402	-0,122

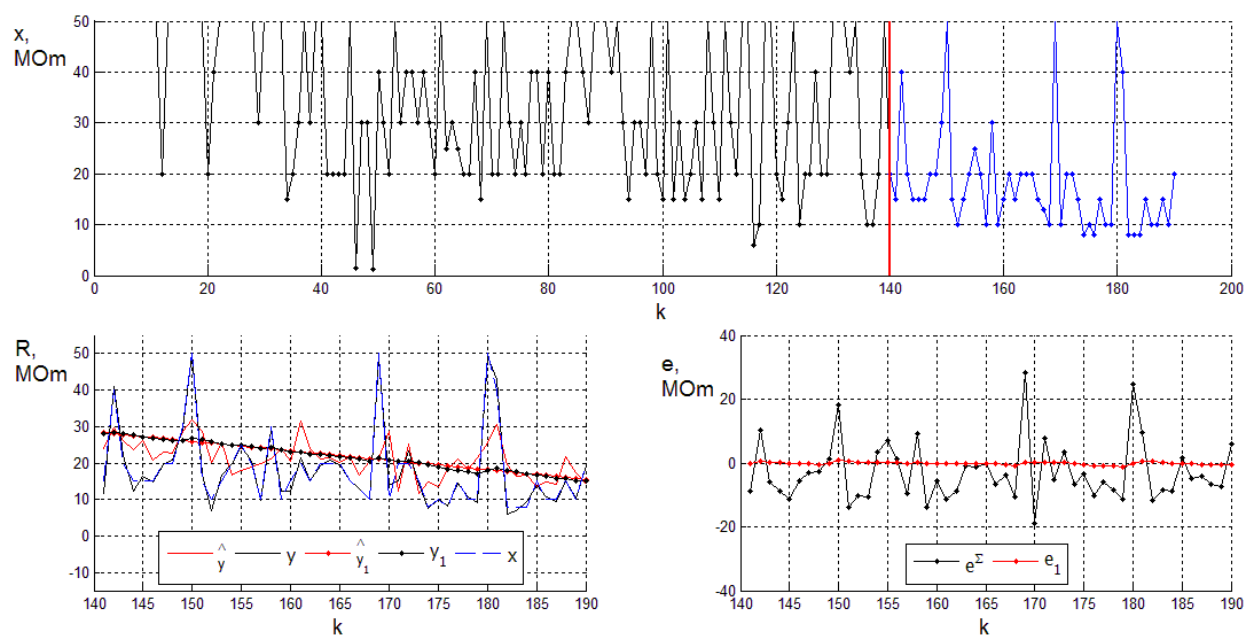


Рис. 9. Результаты прогнозирования сопротивления изоляции якорной цепи электропривода поворота экскаватора ЭШ 40.100

В таблице 2 представлен сравнительный анализ точности прогнозирования предложенного и классических методов.

Таблица 2

Привод	Сравнение СКО ошибок прогнозирования $\sigma(e^z)$, %		
	предложенный метод	ф. Калмана + AR(p)	ф. Калмана + ARMA(p, q)
Подъем	100	122,12	112,71
Тяга	100	113,61	111,2
Поворот	100	110,35	103,8

Выполнена оценка относительной ошибки прогнозирования рассмотренных последовательностей и показано, что предложенный метод может быть использован для прогнозирования диагностических параметров ЭТК экскаватора с различной точностью, в зависимости от числа используемых компонентов разложения. Так, например, относительная погрешность прогнозирования первых компонентов разложения (трендов) последовательностей сопротивления изоляции электроприводов подъема, тяги и поворота на один нормированный шаг $d = 50$ (25 суток) составила 3,63%, 2,85% и 2,23%, соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе рассмотрены методы эффективной эксплуатации электрооборудования главных приводов экскаваторов и раннего предупреждения отказов путем прогнозирования диагностических параметров электротехнического комплекса электропривода.

В работе решены следующие задачи:

- 1) разработана диагностическая модель электротехнического комплекса главных приводов экскаваторов;
- 2) определен состав диагностических параметров, характеризующих техническое состояние ЭТК главных приводов одноковшовых экскаваторов;
- 3) разработана методика предобработки входной последовательности диагностических сигналов ЭТК с целью ее представления в виде суперпозиции компонентов с заданными свойствами;
- 4) разработана адаптивная система прогнозирования компонентов разложения входных последовательностей диагностических сигналов ЭТК с помощью линейных предикторов;

5) определены параметры настройки линейных предикторов, влияющих на точность прогнозирования компонентов разложения входных диагностических сигналов ЭТК главных приводов одноковшовых экскаваторов;

6) постановлены и решены задачи поиска оптимальной структуры разложения входных последовательностей диагностических сигналов ЭТК с использованием результатов прогнозирования компонентов разложения;

7) оценена погрешность предлагаемой методики прогнозирования параметров технического состояния ЭТК электропривода экскаватора.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

Статьи в рецензируемых научных журналах, определенных в ВАК.

1. Шамаль М.А. Диагностика технического состояния электрических машин главных приводов мощных экскаваторов на основе нейронных сетей// Известия высших учебных заведений. Горный журнал, 2005. № 2. С. 44-46.

2. Шамаль М.А., Карякин А.Л. Аппроксимация динамических рядов моделью на основе радиальной базисной сети// Известия высших учебных заведений. Горный журнал, 2006. № 6. С. 33-37.

3. Шамаль М.А., Карякин А.Л. Прогнозирование диагностических параметров электротехнических комплексов главных приводов мощных экскаваторов// Современные проблемы науки и образования (электронный журнал). – 2013. – № 5; URL: <http://www.science-education.ru/111-10409> (дата обращения: 21.10.2013).

Другие публикации.

4. Шамаль М.А. Диагностика технического состояния электрических машин главных приводов мощных экскаваторов на основе нейронной сети // Материалы уральской горнопромышленной декады, г. Екатеринбург, 5-15 апреля 2004 г. / Оргкомитет: Н. Г. Валиев (отв. за выпуск) и др. Екатеринбург: УГГУ, 2004. – С. 494-497.

5. Шамаль М.А. Прогнозирование динамических рядов с помощью линейных нейронных сетей прямого распространения // Материалы уральской горнопромышленной декады, г. Екатеринбург, 3-13 апреля 2006 г. / Оргкомитет: Н. Г. Валиев (отв. за выпуск) и др. Екатеринбург: УГГУ, 2006. – С. 175-177.

6. Шамаль М.А., Карякин А.Л. Система диагностики электрооборудования одноковшовых экскаваторов // Международный научно-промышленный

симпозиум «Уральская горная школа - регионам», г. Екатеринбург, 12-21 апреля 2010 г.: сборник докладов / Оргкомитет: Н. Г. Валиев (отв. за выпуск) и др.; Уральский государственный горный университет. - Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2010. – С. 481-483.

7. Шамаль М.А., Карякин А.Л. Прогнозирование сопротивления изоляции электрических машин главных приводов экскаватора ЭШ 40.100 / VII Международная (XVIII Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводу АЭП-2012. Иваново, 2-4 октября 2012 г. - С. 692-695.

8. Шамаль М.А., Карякин А.Л. Прогнозирование дискретных диагностических сигналов электротехнических комплексов горных машин // Международная научно-практическая конференция «Уральская горная школа - регионам», г. Екатеринбург, 8-9 апреля 2013 г. (Уральская горно-промышленная декада, г. Екатеринбург, 1-10 апреля 2013 г.): сборник докладов / Оргкомитет: Н. Г. Валиев (отв. за выпуск) [и др.]; Уральский государственный горный университет. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2013. – С. 418-419.

9. Шамаль М.А., Карякин А.Л. Программный комплекс "Выбор числа и параметров составляющих функции прогнозирования диагностических параметров электротехнических комплексов": свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013618123 Рос. Федерация / М.А. Шамаль, А.Л. Карякин ; заявитель и правообладатель Шамаль М.А. – № 2013616107; заявл. 15.07.2013. – 1 с.

Подписано в печать 14.11.2013 г.

Бумага писчая. Формат 60x84 1/16

Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе

Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ №

Издательство УГГУ

620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30

Уральский государственный горный университет

Отпечатано с оригинал-макета

в лаборатории множительной техники УГГУ